

6. ADS-B/WAM 機能強化に向けたアレーアンテナ技術の検討

監視通信領域 ※長縄 潤一，宮崎 裕己，田嶋 裕久，古賀 禎，角張 泰之

1 まえがき

我が国における「将来の航空交通システムに関する長期ビジョン（CARATS）」では、航空交通管理における変革の方向性として、軌道ベース運用を中核とした8つの方向性が示されている[1]。それら変革の方向性の1つとして、地上・機上での状況認識能力の向上が掲げられている。地上での状況認識の提供は航空機監視システムの役割であり、代表的なものには二次監視レーダ（SSR: Secondary Surveillance Radar）がある。しかしながら、軌道ベース運用のような高度な運用方式へ対応し、安全性や効率性のさらなる向上を実現するために、より高性能な航空機監視システムが求められている。

そこで SSR よりも高性能な航空機監視システムとして放送型自動従属（ADS-B: Automatic Dependent Surveillance – Broadcast）が検討されている。ADS-B は航空機が自身の位置などを自発的に放送し、それを地上側で受信することで航空監視を実現するものである。ADS-B は地上側設備をシンプルに構成できる一方で、監視情報を航空機からの自己申告に頼っていることから、機上装置不具合による不正な情報ならびに悪意のあるグループによる妨害電波および偽情報に弱いという課題がある[2]。

以上の背景から、電子航法研究所では「従属監視補完技術に関する研究」の一環として、前述したような ADS-B の課題解決に向けた研究開発を進めている。本研究では、我が国で既に導入が進んでいる航空監視システムである広域マルチラテレーション（WAM: Wide Area Multilateration）を活用していくことが効果的であるとの考えで研究開発を進めている。一方で、アレーアンテナ技術にも着目しており、WAM と併用することで、前述した ADS-B の課題解決だけでなく、幅広い機能の強化が期待できる。

本稿では ADS-B/WAM による航空監視にア

レーアンテナ技術を導入した場合にどのような機能が実現可能かを議論する。そして、実現の可能性を確認するために実施した初期的な実験を紹介する。

本稿は以下のように構成される。2 章では ADS-B の課題と対策ならびにアレーアンテナの位置づけを議論する。3 章ではアレーアンテナが実現する機能を議論する。4 章では実験結果を述べる。

2 ADS-B の課題とアレーアンテナの位置づけ

前述のように ADS-B の課題として不正な情報などが挙げられ、様々な対策が検討されている[3-5]。我が国では WAM の導入が進んでおり、WAM を活用することが効果的である。WAM について補足すると、地上受信局で航空機の発するトランスポンダ信号を検出し、その到達時刻差から航空機位置を推定するシステムである。この仕組みを応用して、ADS-B の示す位置が観測された到達時間差と矛盾が無いことを確認すれば、ADS-B 信号の妥当性を検証できる。また、WAM は測位原理上、複数の地上受信局が必要となるが、これは ADS-B の観点からは冗長性の確保となり妨害電波への耐性が得られる。このように WAM の活用は ADS-B 課題解

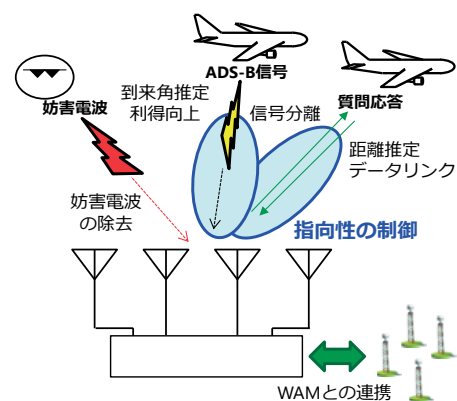


図 1. アレーアンテナ技術のイメージ

決に極めて有益である。筆者らは電子航法研究所の整備している WAM 実験システム[6]を活用して、これらの検証を進めているところである。

以上に加え、本研究ではアレーアンテナ技術[7]にも着目している。アレーアンテナ技術は複数のアンテナ素子を用意し、その入出力信号を合成することでアンテナ全体としての指向性を制御するものである。ADS-B の課題解決のみならず WAM に対しても様々な利点を提供できる（図 1）。一方で、質問機能の有無、ビーム形成の方式（アナログ/デジタル）、アルゴリズムなどにより実現可能な機能が異なり、コストと機能のバランスの両立を探っていく必要がある。そのため、本研究ではアレーアンテナを WAM と併用する付加的な要素として研究を行っている。

3 アレーアンテナが実現する機能

ここでは、アレーアンテナ技術の検討の一環として、ADS-B/WAM へ適用した場合に得られる機能を以下に議論する。

3.1 妨害電波への耐性獲得

アレーアンテナにより指向性を動的に制御できる。妨害電波の方向にはヌルを向けることで、妨害電波がある場合にも ADS-B 信号を継続して受信できるようになる[8]。

3.2 信号環境の悪化に対する耐性獲得

ADS-B の用いる 1090MHz 帯域は多くのシステムと航空機が共有して利用していることから、信号の衝突が頻繁に発生している。これに対して指向性を個別の信号に向けて本来なら衝突してしまう信号同士を分離することができる[9]。その結果、信号環境の厳しい環境においても信号検出性能の低下を防ぐことができる。

3.3 覆域の拡大

指向性を集中させることで、無指向性アンテナを用いるよりも、覆域を拡大できる。

3.4 ADS-B 信号検証

アレーアンテナにより信号の到来方向を推定することができる。これを ADS-B 信号の含む航空機位置と比較することで、ADS-B 信号の内容が正しいかどうかを検証することができる[10]。さらに質問信号を送信できる場合には、

応答受信にかかる時間を測定して航空機までの距離を推定でき（SSR と同様の動作）、これからも ADS-B 信号の正しさを判定できる。

3.5 WAM 測位機能強化

WAM による航空機位置推定において、信号の到達時間差と到来角を併用することで測位機能を強化することができる[11]。測位の数学的な原理上、航空機の 3 次元位置を得るためには最低 3 つの観測値が必要である。WAM では 4 つの受信局から得られる 3 つの到達時刻差を用いている。もし到来角を観測値として加えれば、観測値の数という意味では受信局を追加することと同じ効果が得られる。その結果、受信局の削減が期待されるほか、受信局の削減をしない場合にはシステムの冗長性を増すことになり、妨害電波を含む受信局の欠落に対する耐性を向上できる。

3.6 データリンク機能強化

質問周期が固定される SSR と異なり、指向性を電子的に制御するアレーアンテナは任意の時間に質問を送信でき、迅速なデータリンクを実現できる。

4 初期的な実験

前述した機能のうち、妨害電波除去および到来角推定について初期的な実験を行った結果を報告する。これらの実験は 2 種類の異なるシステム構成で実施している。

4.1 妨害電波除去および到来角推定 [12]

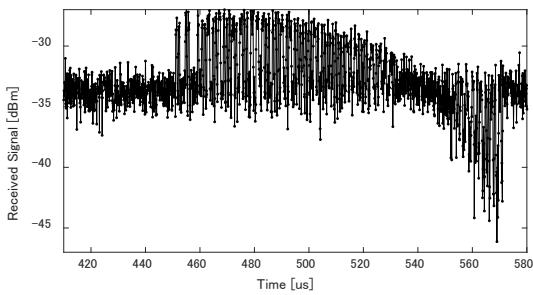
図 2(a)には電波無響室での実験の様子を示す。妨害電波と ADS-B 信号を同時に送信し、それを 4 素子アレーアンテナで受信した。図 2(b)に示すように、妨害電波と ADS-B 信号が混信して解読不能な波形となってしまう。ジャミング信号の特性を推定したのち、その到来方向に対して信号強度に比例したヌルを形成する手法（Power Inversion）を適用した。この結果を図 2(c)に示す。赤色は ADS-B 信号と判定された部分である。先頭のモード S プリアンブルが確認できるなど、波形の復元に成功していることが分かる。

また、同様の環境において ADS-B 送信源のみを用い、受信アレーを回転させながら到来角推定を実施した。到来角ごとに信号の強さを調

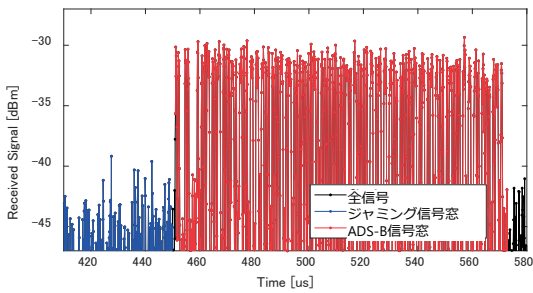
べる Capon 法を適用した。図 3 には ADS-B 送信源がアレー正面にある場合の誤差分布を示す。誤差は平均 1.4° ，標準偏差 1.9° となった。到来角推定に成功しており，到来角による ADS-B 信号検証の可能性を確認できた。



(a) 実験の様子



(b) 妨害電波により歪んだ信号



(c) 妨害電波除去後の信号

図 2. 妨害電波の除去実験

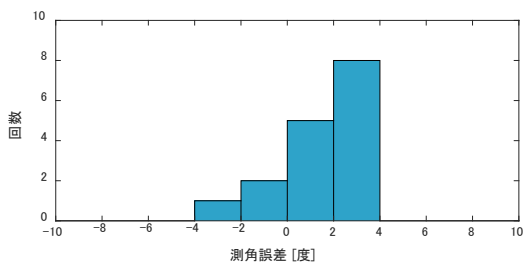
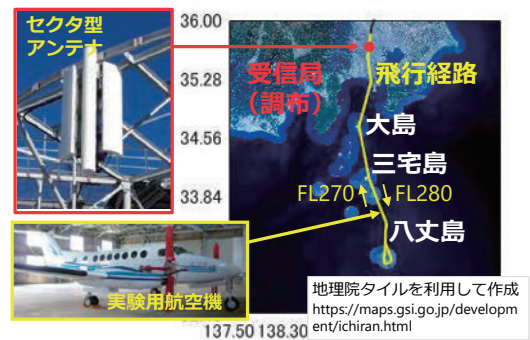


図 3. 到来角誤差分布（アレー正面）

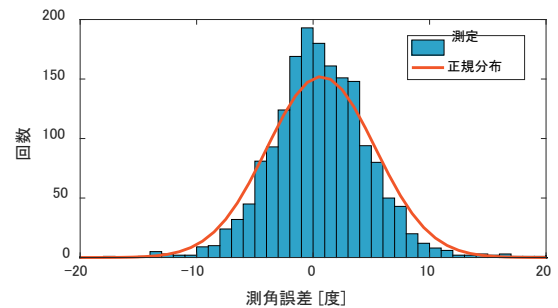
4.2 到来角推定および距離推定

ADS-B/WAM 実験システムはセクタ型アンテナを具備している。本アンテナは本来アレーアンテナとして開発されたものではないが，振幅比較モノパルスと同様な処理により信号到来の方位角を推定することができる[13]。また，質問信号の送信機能を持つため，応答までの時間を測ることで距離を推定できる。

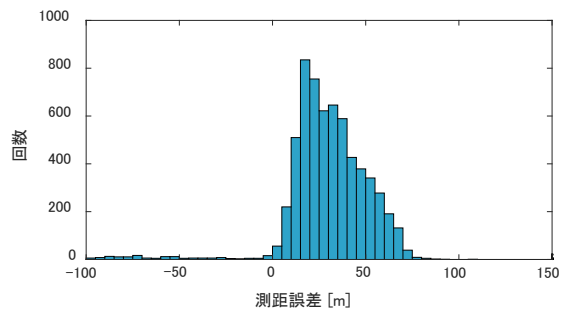
図 4(a)には飛行実験の概要を示す。実験中に記録したデータをオフライン処理することで到来角推定と距離推定を行った。なお飛行実験は



(a) 実験の概要



(b) 到来角の誤差分布



(c) 距離の誤差分布

図 4. 到来角および距離の測定実験

同一経路で複数回行っており、そのうち1回を補正用として用い、他の1回を評価した結果を示す。

図4(b)は到来角の誤差分布（ゼロ付近）を示す。誤差は平均 0.7° 、標準偏差 4.6° となった。また図4(c)には距離誤差の分布（ゼロ付近）を示す。誤差は距離に応じて変化した。全体としては平均30.0 m、標準偏差21.5 mとなった。この結果から、おおまかな到来角と距離の推定に成功しており、ADS-B 信号検証の可能性を確認できた。

むすび

ADS-B の導入に向けては WAM を活用しつつアレーアンテナ技術を併用することで、ADS-B の補完と様々な機能強化を実現することができる。本稿ではアレーアンテナ技術が実現できる機能について議論を行い、初期的な実験結果を示した。今後は引き続き検討・評価を進める予定である。

謝辞

実験に多大なご協力を頂いている関係各位に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 将来の航空交通システムに関する研究会、将来の航空交通システムに関する長期ビジョン、2010.
- [2] M. Strohmeier, et al, “On the Security of the Automatic Dependent Surveillance-Broadcast Protocol,” in IEEE Commun. Surveys Tuts., pp. 1066-1086, Vol. 17, No. 2, Oct. 2015.
- [3] M.R. Manesh, et al, “Analysis of vulnerabilities, attacks, countermeasures and overall risk of the Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) system,” in Int. J. Critical Infrastructure Protection, Vol. 19, pp. 16-31, Dec. 2017.
- [4] FAA, 14 CFR Part 91, Federal Register, Vol. 75, No. 103, May 2010.
- [5] SESAR JU, Final Project Report, Surveillance Ground System Enhancements for ADS-B (Prototype Development), 15.04.05_b, D01, May 2015.
- [6] 宮崎, 古賀, 松永, 角張, 本田, 田嶋, “航空路監視用 WAM 技術の評価について,” 平成27年度（第15回）電子航法研究所研究発表会 講演概要, 2015年6月
- [7] 菊間, アレーアンテナによる適応信号処理, 科学技術出版, 1999.
- [8] M. Leonardi, et al, “ADS-B Jamming Mitigation: A Solution Based on a Multichannel Receiver,” in IEEE Aerosp. & Electronics Syst. Mag., Vol. 32, No. 11, pp.44-51, Dec. 2017.
- [9] N. Petrochilos, et al, “Separation of SSR Signals by Array Processing in Multilateration Systems,” in IEEE Trans. Aerosp. & Electronic Syst., Vol. 45, No.3, pp. 965-982, Jul. 2009.
- [10] C. Reck, et al, “Verification of ADS-B positioning by direction of arrival estimation,” in Int. J. Microw. & Wireless Technol., Vol. 4, No. 2, pp. 181-186, April 2012.
- [11] D. J. Torrieri, “Statistical Theory of Passive Location Systems,” in IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., Vol. 20, No. 2, pp. 183-198, Mar. 1984.
- [12] C. Chomel, J. Naganawa, T. Koga, H. Miyazaki, Y. Kakubari, “Jamming and Spoofing Protection for ADS-B Mode S Receiver through Array Signal Processing,” presented in ENRI Int. Workshop on ATM/CNS (EIWAC 2017), Tokyo, Japan, Nov. 2017.
- [13] J. Naganawa, H. Tajima, H. Miyazaki, T. Koga, and C. Chomel, “ADS-B Anti-Spoofing Performance of Monopulse Technique with Sector Antennas,” in Proc. 2017 IEEE Conf. on Antenna Meas. & Appl., Tsukuba, Japan, Dec. 2017.